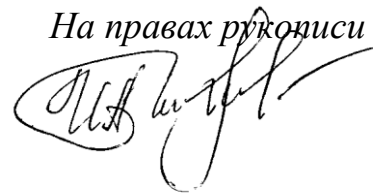


На правах рукописи



Чижов Игорь Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЦИНКОВЫХ
ПОКРЫТИЙ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
НАДЕЖНОСТИ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена на кафедре металловедения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Березовская Вера Владимировна

Официальные оппоненты: Гузанов Борис Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет»
заведующий кафедрой материаловедения и
технологии контроля в машиностроении

Веселов Игорь Николаевич,
кандидат технических наук,
Екатеринбургский филиал ОАО «Российский
научно-исследовательский институт трубной
промышленности», заведующий лабораторией
материаловедения

Ведущая организация: ФГБУН Институт высокотемпературной
электрохимии Уральского отделения РАН

Защита диссертации состоится «26» декабря 2013 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, 3-й учебный корпус, ауд. Мт-329 Института материаловедения и металлургии. Телефон (343) 375-48-08, факс (343) 375-44-39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан 25 ноября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Мальцева Людмила Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Высокая работоспособность и эксплуатационная надежность металлоконструкций, используемых при добыче и первичной переработке нефтепродукта и первыми воспринимающих его воздействие, является важнейшим показателем качества нефтегазодобывающего и перерабатывающего оборудования. Это обусловлено тем, что насосно-компрессорные трубы (далее НКТ) и насосные штанги из перечня скважинного оборудования являются наиболее ответственными и дорогостоящими элементами, используемыми при добыче нефти. Средний срок эксплуатации насосных штанг и НКТ без проведения противокоррозионной защиты составляет при добыче нефти, не содержащей сероводород и микробактерии, 8–10 лет, а в их присутствии снижается до 1–3 лет. Весьма успешным в качестве антикоррозионной меры по защите НКТ и насосных штанг в настоящее время считается использование защитных цинковых покрытий.

Исследования в области металловедения цинковых покрытий, а также защиты нефтегазового и нефтепромыслового оборудования от коррозии представлены в работах таких отечественных и зарубежных авторов, как С. Дж. Слэндер, У. К. Бойд, Е. В. Проскуркин, А. А. Тарасова, И. М. Ковенский, Н. С. Горбунов и др., а в области квалиметрии – в работах Г. Г. Азгальдова, Г. С. Гуна, Г. Ш. Шубина и др. Однако, они часто противоречивы, и кроме того, в них отсутствует системный подход к количественной оценке эксплуатационной надежности цинковых покрытий на изделиях нефтяного сортамента как основного критерия качества.

В связи с широким внедрением в производство нефтедобывающего оборудования процесса цинкования, разработка методики оценки качества цинковых покрытий разной технологии нанесения, предусматривающая использование основных показателей их свойств, является актуальной задачей для сравнительной оценки и эффективного использования трубной продукции в определенных условиях добычи нефти.

Целью работы является исследование структуры и свойств цинковых покрытий и получение на этой основе количественной зависимости для расчета критерия качества покрытий, который позволит охарактеризовать эксплуатационную надежность цинкового покрытия любой технологии нанесения.

Для достижения данной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследовать строение цинковых покрытий, полученных разными способами нанесения, а именно, структуру, химический и фазовый состав слоев покрытия, а также морфологию и кристаллическое строение фаз в покрытии.
2. Определить физико-механические и коррозионные свойства промышленных цинковых покрытий на изделиях нефтяного сортамента.
3. Обосновать и систематизировать выбор показателей качества цинковых покрытий на основе квалитетического подхода.
4. Установить количественную зависимость показателя качества цинкового покрытия, как критерия эксплуатационной надежности, от основных показателей его свойств.

Научная новизна

1. Уточнен химический состав последовательно расположенных слоев горячего цинкового покрытия (ГЦ). На поверхности термодиффузионного (ТДЦ) и гальванического (ГВЦ) цинковых покрытий выявлено присутствие кислорода в виде оксидов.
2. Установлена связь кинетики адгезионного изнашивания покрытий с их слоистым строением. На пути трения скольжения до $L=120$ м в покрытиях ТДЦ и ГВЦ основную роль играют поверхностные окислы, экранирующие контактирующие поверхности, в то время как на подобных поверхностях не окисленных ГЦ покрытий развиваются процессы адгезионного «схватывания» мягкой η -фазы с материалом контртела и выкрашивания хрупкой ζ -фазы. Увеличение пути трения от 120 до 200 м приводит к включению в процесс износа слоев δ_1 (в ТДЦ и ГЦ покрытиях) и Zn (в ГВЦ покрытии). На пути трения от 200 до 240 м наблюдается сближение значений приведенного износа, так как начинает проявляться влияние металла основы, а при $L>240$ покрытия полностью разрушаются.
3. Показано, что низкая стойкость к питтинговой коррозии ГЦ покрытия связана с двухфазностью его поверхностного слоя, состоящего из ζ - и η -фаз разного химического состава и электрохимических свойств.
4. Получена расчетная зависимость комплексного показателя качества цинкового покрытия от его свойств, позволяющая оценить его эксплуатационную надежность, а также проводить сравнительную оценку свойств и эффективности покрытий разной технологии нанесения в различных условиях эксплуатации.

Практическая значимость

1. Показана целесообразность использования покрытий в разных условиях внешнего воздействия: ГВЦ – коррозии, а ТДЦ – износа, в то время как ГЦ покрытия эффективны в коррозионной среде слабой агрессивности (например, в атмосферных условиях) и из-за их значительной толщины обеспечивают достаточно продолжительный срок их службы.

2. Разработаны рекомендации по использованию дополнительной операции оксидирования муфт НКТ путем повышения давления воздуха в печи до 50 кПа на завершающей стадии охлаждения деталей после нанесения ТДЦ покрытия. Внедрение разработанных рекомендаций на участке термодиффузионного цинкования муфт на предприятии ОАО «Первоуральский новотрубный завод» позволило повысить износостойкость покрытия в 1,5 раза, что подтверждено актом внедрения.

3. Разработанная методика расчета комплексного показателя качества цинковых покрытий рекомендована к использованию при сертификации и стандартизации трубной продукции с покрытиями любой технологии нанесения при соответствующих показателях свойств и коэффициентов их весомости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты рентгеноструктурных и микрорентгеноспектральных исследований, позволивших выявить наличие на поверхности ТДЦ и ГВЦ покрытий кислорода, связанного в оксиды цинка.

2. Результаты исследования питтинговой коррозии, показавшие преимущество ТДЦ и ГВЦ покрытий с окисленным поверхностным слоем, перед ГЦ покрытием, содержащем на поверхности ζ - и η -фазы, характеризующиеся низким потенциалом питтингообразования.

3. Результаты трибологических испытаний при трении скольжения, установившие преимущество ТДЦ и ГВЦ покрытий перед ГЦ покрытием с мягкой η -фазой, что объясняется экранированием оксидами их поверхности от адгезионного взаимодействия с контртелом.

4. Уравнение расчета показателя качества цинковых покрытий, позволившее классифицировать ТДЦ, ГЦ и ГВЦ покрытия по эксплуатационной надежности в соответствии с коэффициентами 0,77; 0,58 и 0,35, отвечающих хорошему среднему, удовлетворительному среднему и удовлетворительному ниже среднего уровня свойств.

5. Результаты промышленного опробования разработанной рекомендации по использованию дополнительной операции оксидирования

муфт НКТ после нанесения ТДЦ покрытия с оценкой достижения их более высокой износостойкости.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на IX Межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика коммерческой деятельности» (Красноярск, 2008 г.), X Международной научно-технической уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (Екатеринбург, 2009 г.), XI Международной научно-технической уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (Екатеринбург, 2010 г.), VIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов (Москва, 2011 г.), XII Международной научно-технической уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (Екатеринбург, 2011 г.), I Международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии» (Екатеринбург, 2012 г.), XXI Уральской школе металловедов-термистов (Магнитогорск, 2012 г.), II Международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии» (Екатеринбург, 2012 г.), XIII Международной научно-технической уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (Екатеринбург, 2012 г.).

Публикации

По материалам работы опубликовано 12 работ, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений; изложена на 121 страницах, включает 37 рисунков, 27 таблиц, список литературы содержит 115 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования.

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературы по исследуемой теме. Рассмотрены современные проблемы эксплуатации труб нефтяного сортамента, систематизированы причины аварий колонн НКТ на нефтегазовых месторождениях. Описаны технологии нанесения трех способов цинкования: горячего, гальванического и термодиффузионного. Проведен анализ работ, посвященных изучению проблемы сравнительной

оценки качества цинковых покрытий. Представлен алгоритм комплексной оценки качества цинковых покрытий.

Во **второй главе** описаны материалы и методы исследования их свойств. Материалом исследования в данной работе выбраны трубные стали 45, 30Г2, 37Г2Ф и 37Г2С разных групп прочности по ГОСТ 633-80, НКТ и муфты из которых производятся на ОАО «Первоуральский новотрубный завод» и широко применяются в нефтедобывающей промышленности, как в России, так и за рубежом. Выбор пяти марок сталей для этих целей был обусловлен необходимостью проверки влияния химического состава и прочности материала на свойства цинковых покрытий.

В качестве защитных покрытий использовали промышленное цинкование трех видов: гальваническое, термодиффузионное и горячее. Zn-покрытия наносили на муфты НКТ диаметром 60 мм и образцы-свидетели размером 25×10×10 мм, вырезанные без нагрева из заготовок муфт всех исследованных сталей. Часть заготовок была получена с прокатного нагрева и не подвергалась дополнительной термообработке, другие – для получения необходимых механических свойств прошли стандартную термическую обработку в условиях «Финишного центра» цеха № 4 ОАО «Первоуральский новотрубный завод».

Горячее цинкование было проведено на ОАО «Уралэлектромедь», термодиффузионное цинкование в порошковых смесях выполнили в цехе № 4 ОАО «Первоуральский новотрубный завод», а гальваническое покрытие было нанесено на ОАО «Уральский завод тяжелого машиностроения». Все покрытия были нанесены по промышленным технологиям, принятым на указанных предприятиях. На рис. 2.1 показаны муфты после горячего, гальванического и термодиффузионного цинкования, контроль внешнего вида которых проводили согласно ГОСТ Р 9.316-2006 «Покрытия термодиффузионные цинковые».

Толщину покрытия оценивали методом неразрушающего контроля по ГОСТ 9.302-88 с помощью прибора «Константа К5», в основу работы которого положен принцип вихревых токов. Относительная погрешность метода составляла $\pm 5\%$.

Измерение твердости проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76. Микрошлифы перед измерениями травили в 4% спиртовом растворе HNO_3 . Для определения твердости цинкового покрытия использовали прибор Виккерса с нагрузкой 20 гс.



Рис. 2.1. Муфты НКТ с покрытиями: ГВЦ, ТДЦ, ГЦ

Микроструктуру и химический состав фаз исследовали с помощью светового микроскопа Альтами МЕТ 1 при увеличении от $\times 60$ до $\times 1000$ и растровых электронных микроскопов Tescan Vega II XMU и JSM 6490 с системой энергодисперсионного микроанализа Inca Energy 450 и Oxford Inca.

Фазовый состав гальванических и термодиффузионных цинковых покрытий изучали методом рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА) на дифрактометре ДРОН-3 в Co-K_α -излучении с использованием фильтра β -излучения.

Коррозионные исследования цинковых покрытий проводили в соответствии с ГОСТ 9.912-89 на приборе VoltaLab 10-PGZ100 с программным обеспечением VoltaMaster 4 в 3,5%-растворе хлорида натрия комнатной температуры, используя хлорсеребряный электрод сравнения.

Для оценки износостойкости сравниваемых цинковых покрытий использовали два метода. Первый проводили по заводской методике, состоящей из 30-ти кратного «свинчивания-развинчивания» муфт, оцинкованных разными способами, с трубами тех же марок и групп прочности, на автоматической установке САМ Р-4,5/П-К в цехе № 4 ОАО ПНТЗ. Перед испытанием проводился замер натяга резьбы трубы и муфты (расстояние от торца муфты до конца резьбы на трубе), согласно ГОСТ 633-80, после чего проводилось испытание и повторный замер натяга на резьбе.

По второму методу были проведены трибологические испытания сухого трения скольжения с использованием лабораторной установки при возвратно-поступательном движении образцов по пластине из стали 45. В качестве характеристики износостойкости использовали приведенный на единицу пути трения весовой износ: $\Delta m/L$, где Δm – потери массы образца, мг и L – путь трения, м. Коэффициент трения f определяли как частное от деления силы трения на нормальную нагрузку по формуле (2.1).

$$f = \frac{F}{N} \quad (2.1)$$

Трибологические свойства определяли по результатам трех серий параллельных испытаний.

Прочность сцепления покрытия с основой, адгезию определяли методом нагрева по ГОСТ 9.302-88. При проведении контроля адгезии цинковых покрытий образец с покрытием нагревали до температуры 190 °С, выдерживали при данной температуре в течение 1 ч и охлаждали на воздухе.

Контроль пористости покрытий проводили по ГОСТ 9.302-88 методом погружения в водный раствор калия железосинеродистого (3 г/дм³) и натрия хлористого (10 г/дм³). Образец выдерживали в растворе в течение 5 мин при температуре 18–30 °С. Затем на контролируемой поверхности определяли наличие или отсутствие синих точек, соответствующих числу пор.

В **третьей главе** рассмотрены стандартизированные подходы в оценке качества цинковых покрытий, выявлены их недостатки. С учетом этого обоснованы и систематизированы основные показатели, характеризующие качество покрытий как основного критерия их эксплуатационной надежности и предложен комплексный подход к его оценке.

Выбор необходимых показателей проведен на основе существующих в отрасли критериев оценки качества цинковых покрытий, а также свойств, рекомендованных для анализа любых металлических покрытий.

На основании требований ряда нормативно-технических документов: ГОСТ Р 9.316-2006, ГОСТ Р 9.307-89, СТО 02494680-0034-2004, EN-ISO 1461, при комплексной оценке качества покрытий предлагается использовать следующие показатели их свойств: толщина покрытия, равномерность, пористость, прочность сцепления с основой (адгезия), износостойкость, твердость, коррозионная стойкость (питтингостойкость).

Данные о показателях свойств цинковых покрытий муфт НКТ приведены в таблице 3.1. В качестве базовых показателей принимаются значения, выбор которых обусловлен требованиями, предъявляемыми ГОСТ, ТУ заводов-изготовителей, а также условиями их эксплуатации. Относительные показатели определяются как отношение единичных показателей качества (ЕПК) к базовым показателям. ЕПК определяются экспериментально и характеризуют одно из свойств покрытия, составляющее его качество применительно к определенным условиям получения и эксплуатации. Для расчета комплексного показателя качества предлагается формула (3.1):

$$K = \sum_{i=1}^n q_i a_i, \quad (3.1)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n_i$ – номер показателя;

K – комплексный показатель качества продукции;
 n – число учитываемых показателей;
 a_i – коэффициент весомости i -го показателя качества;
 q_i – относительный i -й показатель качества.

Для определения коэффициентов весомости в работе использовали экспертный метод и метод частных статистик. Уровни градации качества на основе анализа литературных данных установили в соответствии со шкалой, имеющей следующие границы:

- 1) 0...0,20 – низкое качество;
- 2) 0,21...0,37 – качество ниже среднего;
- 3) 0,38...0,63 – среднее качество;
- 4) 0,64...0,79 – качество выше среднего;
- 5) больше 0,80 – высокое качество.

Таблица 3.1

Показатели свойств цинковых покрытий муфт НКТ

№	Показатель качества	Обозначение, единица измерения	Базовое значение показателя свойства
1	Толщина покрытия	T , мкм	60
2	Равномерность покрытия	F , %	5
3	Износостойкость	1) ΔA (изменение натяга резьбы), мм 2) f (коэффициент трения скольжения)	1) 0,50 2) 0,25
4	Питтингостойкость	$E_{\text{по}}$, потенциал питтингообразования, В	– 0,52
5	Твердость	M , единиц HV0,02	520
6	Прочность сцепления с основой	P , балл	1
7	Пористость покрытия	R , балл	1

Четвертая глава посвящена результатам исследования структуры и свойств цинковых покрытий.

Контроль внешнего вида покрытий показал, что выбранные технологии промышленного цинкования позволяют получить сплошные покрытия без каких-либо повреждений, хотя на муфте с горячим покрытием были выявлены локальные наплывы цинка, как на наружной, так и на внутренней (резьбовой) ее поверхности.

Структура горячего цинкового покрытия на сталях исследованного состава приведена на рис. 4.1. В соответствии с диаграммой состояния системы Fe-Zn, при температуре горячего цинкования (450 °С) в структуре покрытий были выявлены следующие слои: светлая зона основного металла – это α -фаза, представляющая собой твердый раствор цинка в α -железе; на

внутренней поверхности покрытия на границе с α -фазой находится Γ -фаза в виде очень тонкого темного слоя (1–3 мкм); далее следует слой δ_1 -фазы, состоящей иногда из 2-х слоев, более однородного, примыкающего к Γ -фазе, и столбчатого, как на рис. 4.1, а. Следующий наиболее толстый слой покрытия составляет ζ -фаза, которая имеет грубую кристаллическую структуру. Поверхностный, наиболее богатый цинком слой, это η -фаза. В целом существенного отличия структуры горячего покрытия на разных стальных основах не выявлено. Согласно металлографическим исследованиям толщина ГЦ покрытия составила 100–120 мкм.

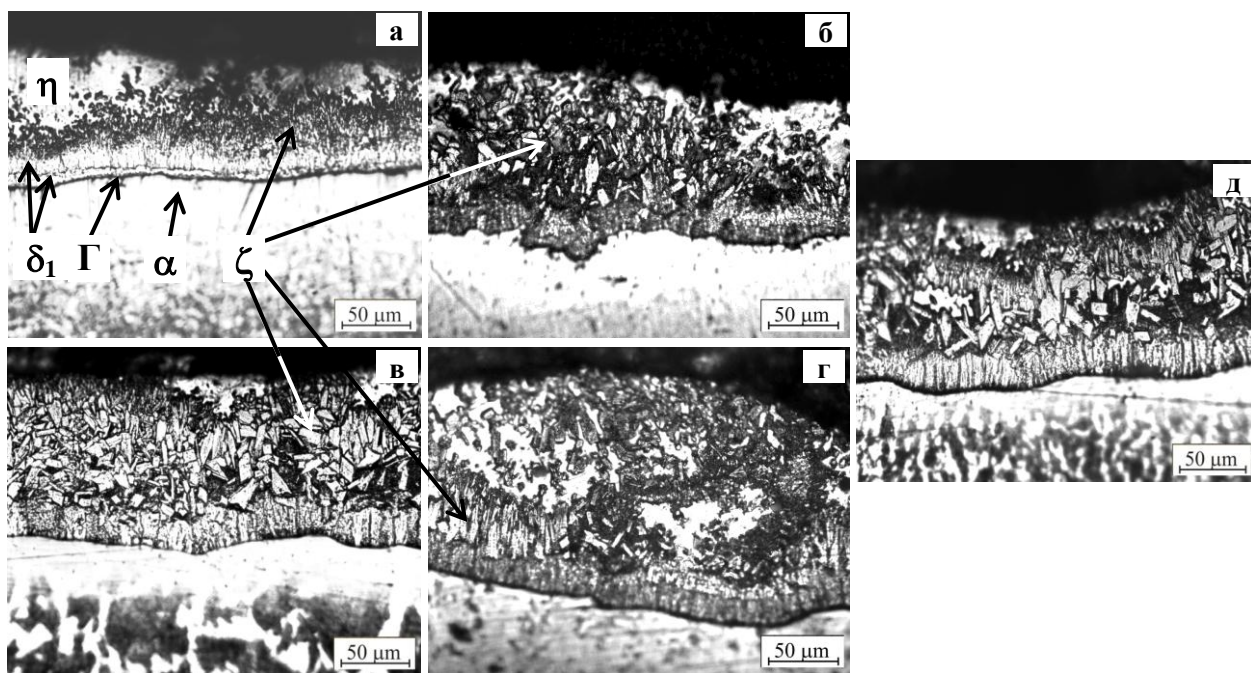


Рис. 4.1. Микроструктура горячего Zn-покрытия на сталях: а – 30Г2 («М»); б – 37Г2Ф («Е»); в – 45 («Д»); г – 30Г2 («Л»); д – 37Г2С («К»)

Результаты микрорентгеноспектрального анализа слоев горячего цинкового покрытия приведены в табл. 4.1. Полученные данные по химическому составу всех слоев цинкового покрытия соответствуют фазовым областям диаграммы Fe-Zn, а экспериментальные данные по стехиометрическому составу фаз (соотношению содержания железа и цинка в слоях) в целом согласуются с литературными данными, за исключением более высокого содержания железа в поверхностном слое η -фазы, что связано с присутствием фрагментов ζ -фазы в этом слое (рис. 4.2).

Установлено, что ГВЦ покрытия на всех исследованных трубных сталях более однородны по фазовому составу, чем горячие. На рис. 4.3, б, в, д показана структура покрытий, полученных на сталях 37Г2Ф, 45 и 37Г2С после горячей прокатки. Наблюдается волокнистость структуры в зоне

покрытия, как проявление текстуры в стали. Особенно отчетливо это видно в стали с мелкозернистой феррито-перлитной структурой (рис. 4.3, б).

Таблица 4.1

Параметры обработки спектров, полученных с ГЦ покрытия в точках 1-11 на рис.4.2
(все результаты – в масс. %)

Спектр	O	Si	Mn	Fe	Zn	Итог	Фаза
Спектр 1	-	0,36	1,48	98,16	-	100,00	основа
Спектр 2	-	0,31	1,32	97,09	1,28	100,00	α
Спектр 3	1,36	-	-	9,23	89,41	100,00	δ_1
Спектр 4	1,33	-	-	7,42	91,25	100,00	δ_1
Спектр 5	3,30	0,29	-	26,83	69,58	100,00	Γ
Спектр 6	1,37	-	-	6,23	92,40	100,00	ζ
Спектр 7	1,25	-	-	0,24	98,51	100,00	η
Спектр 8	1,42	-	-	5,66	92,92	100,00	ζ
Спектр 9	0,96	-	-	0,17	98,87	100,00	η
Спектр 10	-	0,28	0,67	47,07	51,98	100,00	α
Спектр 11	2,45	0,25	-	22,93	74,37	100,00	Γ
Макс.	3,30	0,36	1,48	98,16	98,87	-	-
Мин.	0,96	0,25	0,67	0,17	1,28	-	-

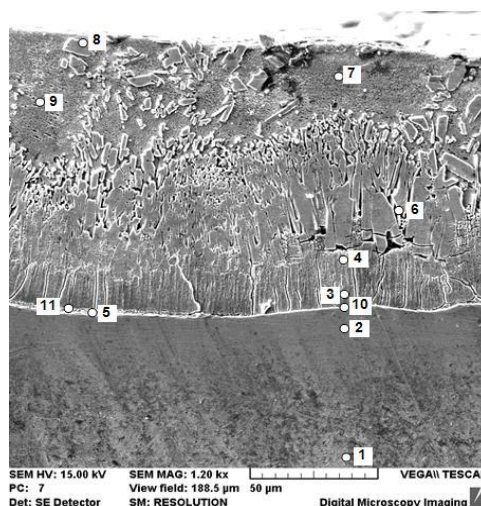


Рис. 4.2. Микроструктура горячего цинкового покрытия

ТДЦ покрытие не имело ярко выраженной слоистой структуры, как ГЦ покрытие, и о нем можно было судить только по меньшей степени травимости поверхности из-за насыщения цинком (рис. 4.4).

Указанной особенностью структуры ГВЦ и ТДЦ покрытий была обусловлена необходимость проведения рентгеноструктурных исследований этих покрытий в отличие от ГЦ. В табл. 4.2 приведены результаты рентгеноструктурного анализа (РСФА) ТДЦ покрытия. Экспериментальные расчеты межплоскостного расстояния фаз в покрытии хорошо согласуются с табличными данными. Показано, что структура ТДЦ покрытия по сечению состоит из Γ фазы состава $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$, имеющей сложную кубическую решетку, и δ_1 -фазы состава FeZn_{10} с гексагональной кристаллической решеткой.

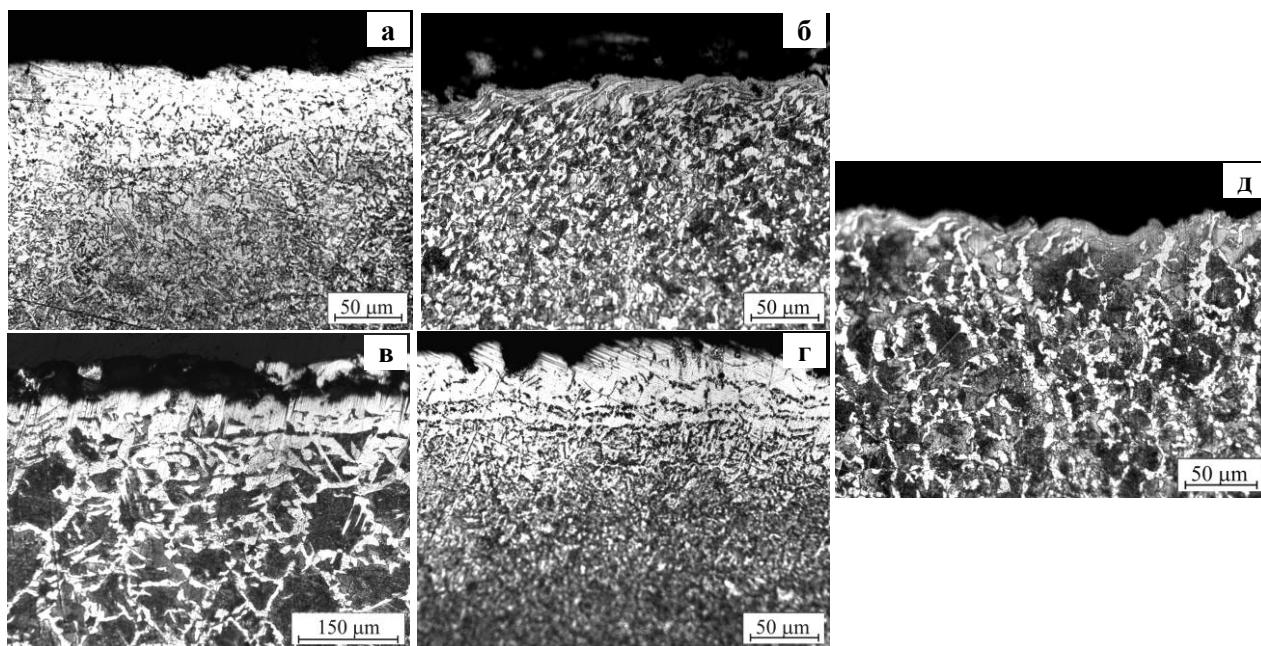


Рис.4.3. Микроструктура гальванического покрытия на сталях: а – 30Г2 («М»); б – 37Г2Ф («Е»); в – 45 («Д»); г – 30Г2 («Л»); д – 37Г2С («К»)

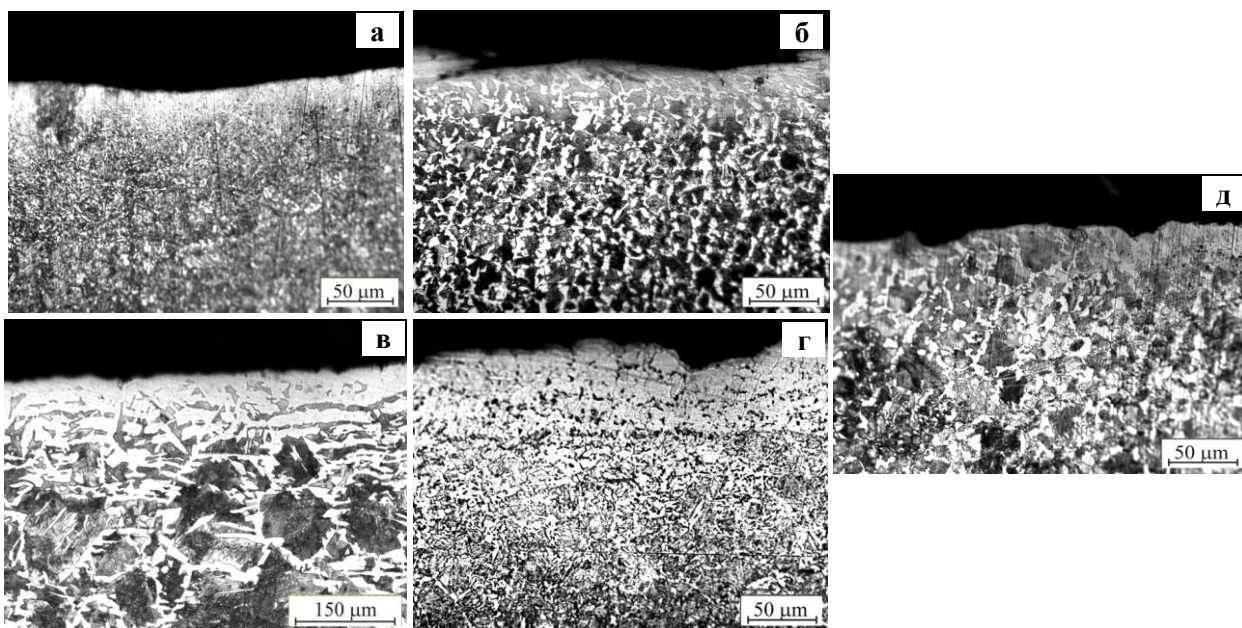


Рис. 4.4. Микроструктура термодиффузионного покрытия на сталях: а – 30Г2 («М»); б – 37Г2Ф («Е»); в – 45 («Д»); г – 30Г2 («Л»); д – 37Г2С («К»)

Выявлены также сильные линии оксида цинка ZnO на фоне линий других фаз, количество которых значительно больше.

Микрорентгеноспектральный анализ ТДЦ покрытия в поперечном сечении шлифа (рис. 4.5 и табл. 4.3) подтвердил результаты РСФ-анализа (табл. 4.2). Выявлены две зоны покрытия, соответствующие по химическому составу фазам δ_1 и Γ , имеющих соответственно гексагональную и кубическую решетку. Примыкающий к Γ -фазе слой α -фазы основного металла был обогащен цинком. В то же время, поверхностный слой покрытия

по результатам МРСА оказался обогащенным кислородом в связанном в оксид ZnO виде, что вполне допустимо в условиях термодиффузионного цинкования в относительно невысоком вакууме.

Таблица 4.2

РСФА термодиффузионных цинковых покрытий

№ линии	Интенсивность линии, отн. единицы	$2\theta^\circ$	d_{hkl}/n , нм (эксперимент)	d_{hkl}/n табличные (интенсивность линии)						
				α -Fe, ОЦК $a=0,287$ нм	Индексы ин-терференции, hkl	Γ , кубич. $a=0,899$ нм (Fe ₃ Zn ₁₀)	Индексы ин-терференции, hkl	δ , гексагон. $a=0,128$, $c=0,574$ нм (FeZn ₁₀)	Индексы ин-терференции, hkl	ZnO, гексагон. $a=0,325$ нм $c=0,521$ нм
1	20	37,2	0,282							0,282 (71)
2	20	40,3	0,260			0,258 (70)	620			0,260 (56)
3	20	42,4	0,247					0,247 (7)	235	0,248 (100)
4	20	43,8	0,240					0,244 (4)	04 11	
5	10	44,9	0,234					0,235 (4)	146	
6	20	48,3	0,219					0,219 (45)	154	
7	50	50,0	0,212			0,211 (100)	660	0,214 (100)	330	
8	20	51,2	0,208					0,210 (31)	241	
9	100	52,5	0,203	0,2027 (100)	110			0,204 (7)	05 11	
10	10	54,0	0,197					0,199 (10)	249	
11	20	55,7	0,191			0,190 (70)	842			0,191 (29)
12	40	77,3	0,144	0,1433 (20)	200	0,145 (50)	12 22			0,141 (6)
13	20	94,2	0,122	-	-	0,121 (100)	14 42			0,123 (5)
14	50	99,7	0,117	0,117 (40)	211	0,119 (50)	14 44			0,118 (3)
15	10	109,5	0,110	-	-	0,110 (70)	16 40			0,109 (10)
16	40	124,1	0,101	0,1013 (10)	220	0,103 (70)				0,104 (10)

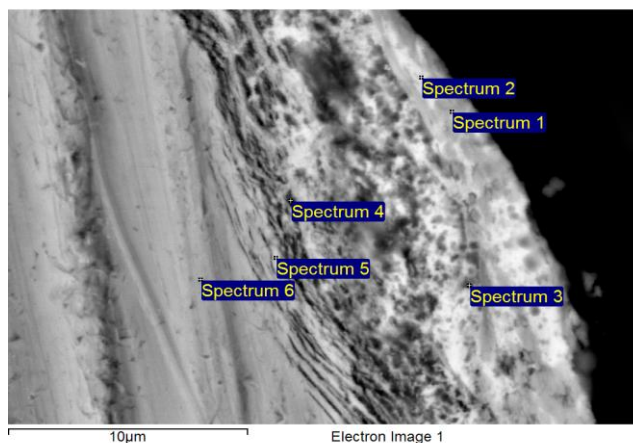


Рис. 4.5. Микроструктура термодиффузионного цинкового покрытия

Результаты РСФА гальванического покрытия приведены в табл. 4.4. На дифрактограмме выявлены линии цинка, а также оксида цинка ZnO на поверхности. Микроанализ покрытия (табл. 4.5) с трех фрагментов структуры поверхности образца (рис. 4.6, а–в), снятых интегрально со всей

Таблица 4.3

Параметры обработки спектров, полученных с точек 1-6 ТДЦ покрытия на рис.4.5 (все результаты – в масс. %)

Спектр	O	Si	Mn	Fe	Zn	Итог	Фаза
Спектр 1	9,70	-	-	4,53	85,77	100,00	ZnO
Спектр 2	5,46	-	-	11,15	83,39	100,00	δ_1
Спектр 3	4,17	-	0,58	21,47	73,78	100,00	Γ
Спектр 4	3,70	-	0,95	68,24	27,11	100,00	α
Спектр 5	-	0,29	0,80	89,82	9,09	100,00	α
Спектр 6	-	-	1,37	96,85	1,78	100,00	α
Макс.	9,70	0,29	1,37	96,85	85,77	-	-
Мин.	3,70	0,29	0,58	4,54	1,78	-	-

Таблица 4.4

РСФА гальванических цинковых покрытий

№ линии	Интенсивность в линии, отн. единицы	$2\theta^\circ$	d_{hkl}/n (эксперимент)	α -Fe, ОЦК $a=0,287\text{нм}$	Индексы интерференции, hkl	d_{hkl}/n (табличные)		
						Zn, гексагон $a=0,266\text{нм}$ $c=0,495\text{нм}$ (Co)	Индексы интерференции, hkl	ZnO, гексагон. $a=0,325\text{нм}$ $c=0,521\text{нм}$ (Cu)
1	10	36,6	0,285					0,282 (71)
2	40	42,4	0,248			0,246 (25)	002	0,247 (100)
3	80	45,6	0,231			0,230 (20)	100	
4	100	50,7	0,209			0,208 (100)	101	
5	60	52,4	0,203	0,201 (100)	110			0,191 (29)
6	60	64,1	0,169			0,168 (14)	102	0,163 (40)
7	20	77,3	0,143	0,143 (20)	200			0,141 (6)
8	40	83,6	0,134					0,136 (14)
9	80	84,4	0,133			0,133 (18)	110	
10	70	99,6	0,117	0,117 (40)	211			
11	40	101,8	0,116			0,117 (12)	112	
12	60	105,6	0,113			0,112 (8)	201	
13	40	117,6	0,105			0,104 (2)	202	0,104 (10)
14	40	124,1	0,101	0,101(10)	220			

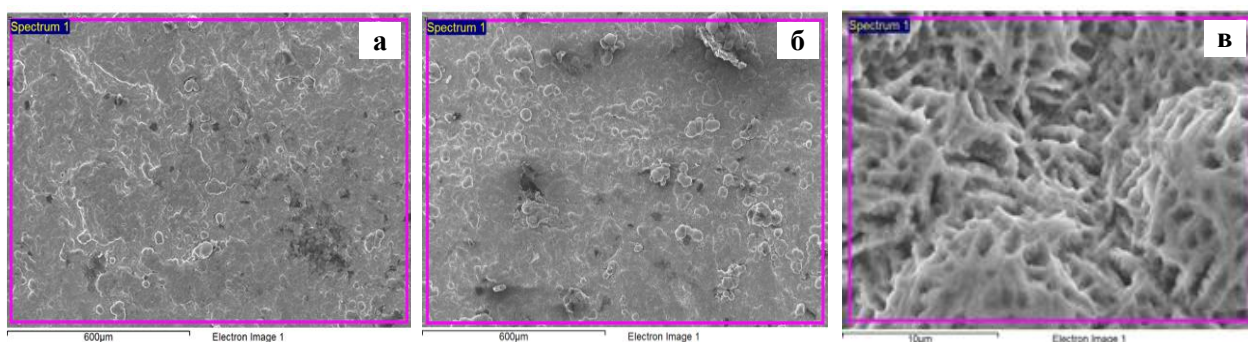


Рис. 4.6. Фрагменты анализируемой поверхности ГВЦ покрытия: а – спектр 1; б – спектр 2; в – спектр 3

На основе анализа результатов измерений методом неразрушающего контроля сделан вывод о том, что толщина покрытия на образцах,

оцинкованных горячим способом, значительно превышает толщину цинковых покрытий, полученных по технологиям гальванического и термодиффузионного цинкования.

Таблица 4.5

Параметры обработки спектров, полученных с фрагментов 1–3 ГВЦ покрытия на рис. 4.6

Спектр	O	Si	Cr	Al	Fe	Zn	Итог	Фаза
Спектр 1	3,18	0,25	0,35	0,50	-	95,72	100,00	Zn/ZnO
Спектр 2	4,50	0,42	0,31	0,42	0,64	93,71	100,00	Zn/ZnO
Спектр 3	3,47	-	0,44	-	0,62	95,47	100,00	Zn/ZnO
Макс.	4,50	0,42	0,44	0,50	0,64	95,72	-	-
Мин.	3,18	0,25	0,31	0,42	0,62	93,71	-	-

Толщина покрытия ГЦ составила $T = 95$ мкм, что в среднем на 55 мкм больше толщины покрытия ТДЦ и на 75 мкм толщины покрытия ГВЦ. В то же время, сравнивая значения толщины покрытия в зависимости от материала основы, отметим, что существенного различия не наблюдается.

Оценка равномерности покрытий проводилась на основе определения среднего отклонения от среднеарифметического значения толщины покрытия, выраженного в процентах (F , %). Более равномерными цинковыми покрытиями оказались ТДЦ и ГВЦ покрытия с F равными 5,4% и 6,2%, соответственно. ГЦ-покрытие можно считать недостаточно равномерным с отклонением от среднего значения 10,5%.

Результаты измерения твердости покрытий на образцах разных марок сталей приведены в табл. 4.6. Показано, что термодиффузионные покрытия за счет присутствия в поверхностных слоях твердой δ_1 -фазы оказались более твердыми. Из табл. 4.6 также видно, что в рамках одной технологии нанесения цинкового покрытия его твердость для разного материала подложки меняется незначительно. В этой связи, при расчете комплексного показателя качества будут использованы средние значения твердости по каждому из видов покрытия.

Установлено, что цинковое покрытие, полученное по технологии термодиффузионного цинкования, обладает повышенной износостойкостью в сравнении с ГВЦ покрытием. После 30-ти циклов навинчивания муфты с ТДЦ покрытием отмечается уменьшение натяга резьбы на 1,5 мм, с ГВЦ покрытием – на 2,6 мм, с ГЦ покрытием – на 4,3 мм. При этом размер натяга резьбы на первых двух муфтах остался в пределах допуска, а результаты измерения последней превысили это значение. Кроме того, на муфтах с ТДЦ и ГВЦ покрытиями имеются разрушения по вершинам резьбы. На муфте с цинковым покрытием, полученным горячим способом, наблюдается полное разрушение покрытия.

Таблица 4.6

Твердость цинковых покрытий разной технологии нанесения

Материал		Твердость покрытия, HV0,02		
№ режима ТО	Марка стали	ГВЦ	ТДЦ	ГЦ
1	30Г2	93	332	59
2	37Г2Ф	89	321	61
3	45	92	319	58
4	30Г2	91	329	62
5	37Г2С	92	325	60
Средние значения:		91	325	60

Результаты трибологических испытаний показывают (рис. 4.7 а, б), что горячее покрытие на пути трения $L=40\text{--}120$ м характеризуется большими значениями приведенного износа $\Delta m/L=(57,3\text{--}89,1)\cdot 10^{-3}$ мг/м и коэффициента трения ($f=0,60\text{--}0,53$) по сравнению с ГВЦ и ТДЦ покрытиями. При увеличении пути трения до $L=200$ и $L=240$ м у образца, подвергнутого горячему цинкованию, приведенный износ снижается соответственно до $\Delta m/L=38,9\cdot 10^{-3}$ мг/м и $\Delta m/L=16,3\cdot 10^{-3}$ мг/м, а коэффициент трения уменьшается до $f=0,43\text{--}0,44$.

В рассматриваемых условиях сухого трения скольжения на воздухе при относительно небольшой нормальной нагрузке ($N = 49$ Н) у образцов из стали 30Г2 с ГВЦ и ТДЦ покрытиями наблюдается такая кинетика изнашивания, при которой существенную роль играют поверхностные окислы. Присутствующие до испытаний или возникающие в результате трибохимических реакций окислы эффективно экранируют контактирующие поверхности и препятствуют их адгезионному взаимодействию. Вследствие этого изнашивание покрытий ГВЦ и ТДЦ на отрезке пути трения ($L=40\text{--}120$ м) характеризуется малой интенсивностью разрушения по сравнению с ГЦ, в котором исходно окислы цинка не наблюдались. При испытании на трение скольжения ГЦ покрытия в значительной степени развиваются процессы схватывания мягкой η -фазы с материалом контртела, при котором разрушение покрытия является, главным образом, следствием образования и разрыва металлических связей. Негативную роль играет также выкрашивание хрупкой ζ -фазы. Дальнейшее увеличение пути трения ($L=120\text{--}200$ м) приводит к износу оксидных слоев на ГВЦ и ТДЦ покрытиях, включению в процесс соответственно Zn и δ_1 -фазы и, как следствие, к ускорению износа в первом случае и замедлению во втором. В процесс изнашивания ГЦ покрытия включаются слои δ_1 и Γ -фаз, и износ, как и ТДЦ покрытия замедляется. Последующее увеличение пути трения ($L= 200\text{--}240$ м) приводит

к постепенному сближению приведенного износа, так как начинает проявляться влияние металла основы. Таким образом, адгезионное изнашивание горячего покрытия характеризуется более быстрым разрушением по сравнению с изнашиванием покрытий ГВЦ и ТДЦ с окисленной поверхностью. При расчете комплексного критерия качества покрытий показателем износостойкости будет выбран коэффициент трения f на пути $L=120$ м, выбор величины которого обусловлен необходимостью исключить влияние основы на результаты испытаний. Так, для ГЦ покрытия коэффициент трения f равен 0,56, ГВЦ – 0,47, а ТДЦ – 0,42. Полученные результаты имеют хорошую корреляцию со значениями твердости покрытий, приведенными в табл.4.6.

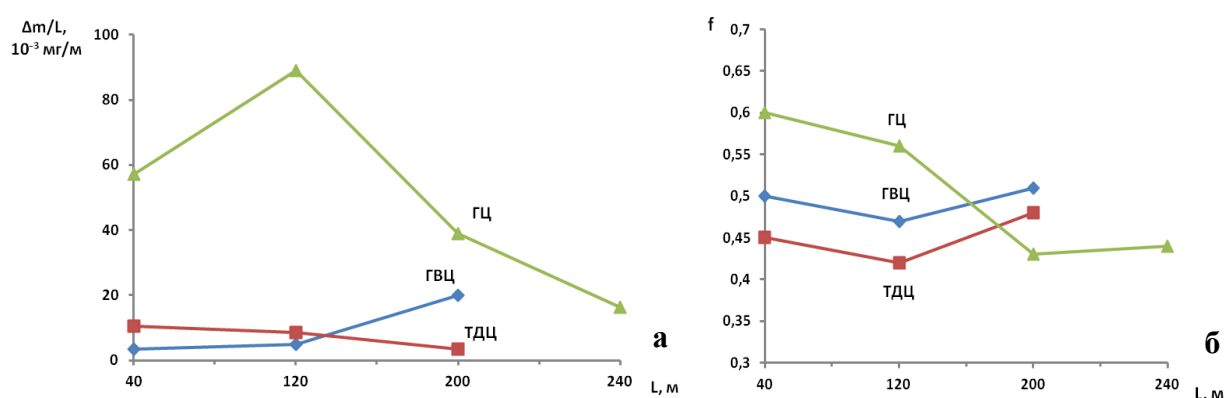


Рис. 4.7. Зависимости приведенного весового износа $\Delta m/L$ от пути трения L (а) и коэффициента трения f от пути трения L (б) при последовательных испытаниях на трение скольжения стали 30Г2 с цинковыми покрытиями

Результаты исследования питтинговой коррозии (ПК) цинковых покрытий разной технологии нанесения, полученные на стали 30Г2 группы прочности «Л», представлены на рис. 4.8, а.

Кривые ПК цинкового покрытия всех исследованных видов, а также зависимость потенциалов E_{no} и разности потенциалов ΔE от вида покрытия (рис. 4.8, б) подтвердили, что наиболее стойкое к ПК – гальваническое покрытие, менее стойким к питтинговой коррозии следует считать горячее цинкование. Кроме того отметим, что сопротивление питтинговой коррозии всех исследованных трубных сталей без покрытий достаточно низкое: число образующихся питтингов более, чем в 20 раз выше, чем на сталях с покрытиями. Согласно данным гистограммы (рис. 4.8, б), были определены показатели питтингостойкости покрытий, а именно, средние значения потенциалов питтингообразования E_{no} : для ГЦ покрытия $E_{no} = -0,980$ В; для ГВЦ покрытия $E_{no} = -0,700$ В; для ТДЦ покрытия $E_{no} = -0,790$ В.

При проведении оценки прочности сцепления (адгезия) покрытия с основой методом нагрева ни на одном из трех образцов не было обнаружено вздутий или отслаиваний покрытия, что недопустимо в соответствии с

требованиями ГОСТ 9.302-88. На основании этого было принято, что в условиях данного эксперимента адгезия всех исследованных покрытий достаточно высокая, и данный показатель для них имеет значение, равное 1.

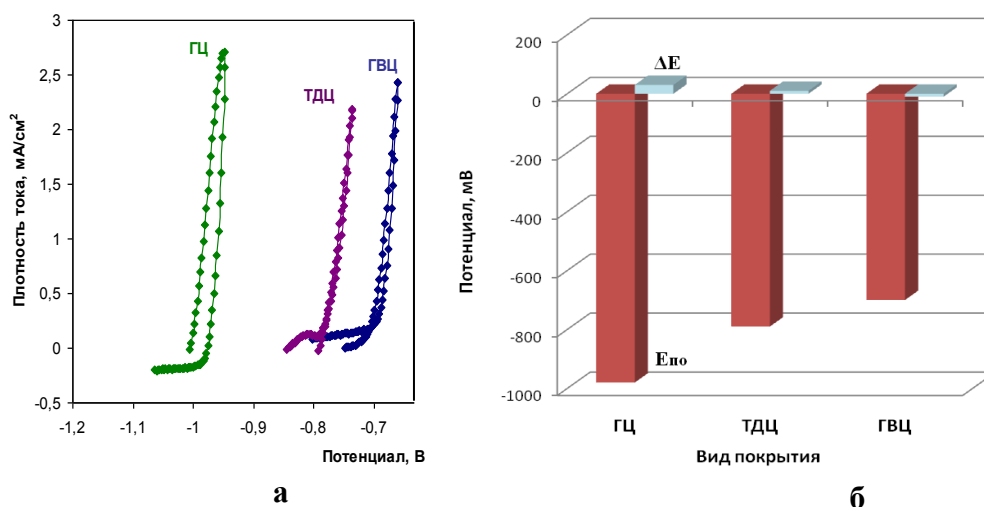


Рис. 4.8. Кривые ПК покрытий разной технологии нанесения на стали 30Г2 (а); гистограммы $E_{но}$ и ΔE (б)

При определении пористости покрытия методом погружения в специальный водный раствор на поверхности образца с гальваническим цинковым покрытием обнаружены окрашенные точки, свидетельствующие о наличии пор. На контролируемой поверхности образцов с другими видами цинкового покрытия пор не обнаружено. Следовательно, для ГЦ и ТДЦ покрытий показатель пористости равен 1, для ГВЦ – 0.

В пятой главе приведен расчет комплексного показателя качества цинковых покрытий. Вычисленные и сопоставленные коэффициенты весомости, определенные экспертным и аналитическим методом (методом частных статистик) приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Коэффициенты весомости, полученные разными методами

Методики	Толщина	Равномерность	Износостойкость	Коррозионная стойкость	Микротвердость	Прочность сцепления с основой	Пористость покрытия
Метод экспертного опроса	0,166	0,158	0,193	0,159	0,101	0,131	0,092
Метод частных статистик 1	0,120	0,150	0,110	0,070	0,180	0	0,370
Метод частных статистик 2	0,090	0,120	0,310	0,050	0,140	0	0,290

Как следует из табл. 5.1, весовой коэффициент показателя «прочность сцепления с основой», рассчитанный по методу частных статистик оказался равным нулю. В квалиметрии введено понятие о незначимых коэффициентах

весомости. Физический смысл этого допущения можно охарактеризовать следующим образом: факторы, для которых весовые коэффициенты оказались равными нулю, не определяют воздействия на качество цинкового покрытия в целом.

При объединении единичных показателей качества (ЕПК) в комплексный показатель качества K использовали арифметическое усреднение, используя выражение (5.1).

$$K = \left[\left(\frac{x_i^T}{x_{\bar{\sigma}az}^T} \right)^b \alpha_i^T \right] \beta_i^T + \left[\left(\frac{x_i^{\mathfrak{Z}}}{x_{\bar{\sigma}az}^{\mathfrak{Z}}} \right)^b \alpha_i^{\mathfrak{Z}} \right] \beta_i^{\mathfrak{Z}} + \left[\left(\frac{x_i^{\Phi}}{x_{\bar{\sigma}az}^{\Phi}} \right)^b \alpha_i^{\Phi} \right] \beta_i^{\Phi}, \quad (5.1)$$

$$\text{где } \begin{cases} |x_i| < |x_{\bar{\sigma}az}| \Rightarrow b = +1 \\ |x_i| > |x_{\bar{\sigma}az}| \Rightarrow b = -1 \\ |x_i| = |x_{\bar{\sigma}az}| \Rightarrow b = 0 \end{cases}$$

$x_i^T, x_i^{\mathfrak{Z}}, x_i^{\Phi}$ – экспериментальные значения показателей качества технологических, эксплуатационных и физико-механических характеристик свойств, соответственно.

$x_{\bar{\sigma}az}^T, x_{\bar{\sigma}az}^{\mathfrak{Z}}, x_{\bar{\sigma}az}^{\Phi}$ – базовые значения показателей качества.

$\alpha_i^T, \alpha_i^{\mathfrak{Z}}, \alpha_i^{\Phi}$ – коэффициенты весомости ЕПК в своей группе технологических, эксплуатационных и физико-механических характеристик.

$\beta_i^T, \beta_i^{\mathfrak{Z}}, \beta_i^{\Phi}$ – коэффициенты весомости группы показателей технологических, эксплуатационных и физико-механических характеристик.

Выражение (5.1) представляет собой двухступенчатую систему оценки качества, учитывающую весомость как единичных показателей, так и группы показателей на основе экспертного опроса.

При использовании коэффициентов весомости, вычисленных аналитическим методом, групповые весовые коэффициенты не принимаются в расчет, и оценка комплексного показателя ведется по формуле (5.2).

$$K = \left[\left(\frac{x_i^T}{x_{\bar{\sigma}az}^T} \right)^b \alpha_i^T \right] + \left[\left(\frac{x_i^{\mathfrak{Z}}}{x_{\bar{\sigma}az}^{\mathfrak{Z}}} \right)^b \alpha_i^{\mathfrak{Z}} \right] + \left[\left(\frac{x_i^{\Phi}}{x_{\bar{\sigma}az}^{\Phi}} \right)^b \alpha_i^{\Phi} \right] \quad (5.2)$$

Таким образом, для расчета значений показателя K были использованы следующие данные: коэффициенты весомости (табл. 5.1), экспериментальные значения ЕПК и базовые показатели свойств (табл. 5.2). Для каждого вида покрытия комплексный показатель качества рассчитывался дважды, так как показатель износостойкости определяли двумя способами, согласно табл. 5.2.

Таблица 5.2

Данные для расчета частных критериев качества цинковых покрытий

Наименование и единица измерения ЕПК	Обозначение	Значения ЕПК			
		Расчетное (экспериментальное)			Базовое
		ГВЦ	ГЦ	ТДЦ	
1. Технологические характеристики					
Толщина покрытия, мкм	T	21,0	96,0	41,0	60,0
Равномерность покрытия, %	F	6,2	10,5	5,4	5,0
2. Эксплуатационные характеристики					
Износостойкость: 1) изменение натяга резьбы после 30 С-Р, мм 2) коэффициент трения скольжения на пути трения L=120 м.	1) ΔA 2) f	1) 2,6 2) 0,47	1) 4,3 2) 0,56	1) 1,5 2) 0,42	1) 0,5 2) 0,25
Питтингостойкость (потенциал питтингообразования), В	E _{по}	-0,700	-0,980	-0,790	-0,520
3. Физико-механические характеристики					
Твердость, единиц HV0,02	M	91,0	60,0	327,0	520,0
Прочность сцепления с основой, балл	P	1	1	1	1
Пористость покрытия, балл	R	0	1	1	1

В результате, подставив значения ЕПК в выражение (5.1), получили значения K для гальванического цинкового покрытия:

$$1) K_{\text{ГВЦ}} = \left[\frac{21}{60} \times 0,51 + \frac{5,0}{6,2} \times 0,49 \right] \times 0,32 + \left[\frac{0,5}{2,6} \times 0,55 + \frac{-0,520}{-0,700} \times 0,45 \right] \times 0,35 + \left[\frac{91}{520} \times 0,31 + \frac{1}{1} \times 0,40 + \frac{0}{1} \times 0,29 \right] \times 0,32 = 0,48;$$

$$2) K_{\text{ГВЦ}} = \left[\frac{21}{60} \times 0,51 + \frac{5,0}{6,2} \times 0,49 \right] \times 0,32 + \left[\frac{0,25}{0,47} \times 0,55 + \frac{-0,520}{-0,700} \times 0,45 \right] \times 0,35 + \left[\frac{91}{520} \times 0,31 + \frac{1}{1} \times 0,40 + \frac{0}{1} \times 0,29 \right] \times 0,32 = 0,55.$$

Расчеты значений показателя K свидетельствуют о хорошей сопоставимости результатов, полученных с использованием методики оценки износостойкости заводским методом и лабораторным, вследствие чего в дальнейших расчетах используем значения f , вычисленных методом трибологических испытаний.

Для покрытия, полученного горячим способом:

$$K_{\text{ГЦ}} = \left[\frac{60}{96} \times 0,51 + \frac{5,0}{10,5} \times 0,49 \right] \times 0,32 + \left[\frac{0,25}{0,56} \times 0,55 + \frac{-0,520}{-0,980} \times 0,45 \right] \times 0,35 + \left[\frac{60}{520} \times 0,31 + \frac{1}{1} \times 0,40 + \frac{1}{1} \times 0,29 \right] \times 0,32 = 0,58.$$

Для покрытия, полученного термодиффузионным способом:

$$K_{\text{ТДЦ}} = \left[\frac{41}{60} \times 0,51 + \frac{5,0}{5,4} \times 0,49 \right] \times 0,32 + \left[\frac{0,25}{0,42} \times 0,55 + \frac{-0,520}{-0,840} \times 0,45 \right] \times 0,35 + \\ + \left[\frac{327}{520} \times 0,31 + \frac{1}{1} \times 0,40 + \frac{1}{1} \times 0,29 \right] \times 0,32 = 0,76.$$

Расчеты показателя K на основе аналитического метода вычисления весовых коэффициентов показали следующие результаты:

Для гальванического цинкового покрытия:

$$K_{\text{ГВЦ}} = \frac{21}{60} \times 0,09 + \frac{5}{6,2} \times 0,12 + \frac{0,25}{0,47} \times 0,31 + \frac{-0,520}{-0,700} \times 0,05 + \frac{91}{520} \times 0,14 + \frac{1}{1} \times 0 + \frac{0}{1} \times 0,29 = 0,35.$$

Для покрытия, полученного горячим способом:

$$K_{\text{ГЦ}} = \frac{60}{96} \times 0,09 + \frac{5}{10,5} \times 0,12 + \frac{0,25}{0,56} \times 0,31 + \frac{-0,520}{-0,980} \times 0,05 + \frac{60}{520} \times 0,14 + \frac{1}{1} \times 0 + \frac{1}{1} \times 0,29 = 0,58.$$

Для покрытия, полученного термодиффузионным способом:

$$K_{\text{ГЦ}} = \frac{41}{60} \times 0,09 + \frac{5}{5,4} \times 0,12 + \frac{0,25}{0,42} \times 0,31 + \frac{-0,520}{-0,790} \times 0,05 + \frac{327}{520} \times 0,14 + \frac{1}{1} \times 0 + \frac{1}{1} \times 0,29 = 0,77.$$

Сопоставив рассчитанные комплексные показатели с принятой шкалой градации свойств, установили, что наиболее надежным в эксплуатации является ТДЦ покрытие (хорошего выше среднего качества), наименее надежно ГВЦ покрытие (удовлетворительного ниже среднего качества); ГЦ покрытие занимает промежуточное положение, (удовлетворительного среднего качества). Учитывая результаты расчетов и принимая во внимание требования отечественных и зарубежных ГОСТ и нормативно-технической документации (ГОСТ 633-80, ГОСТ Р 51906-2002, ГОСТ Р 52203-2004, ГОСТ Р 53365-2009, ГОСТ Р 53366-2009, API spec 5CT и др.) к технологии нанесения цинкового покрытия на резьбовое соединение НКТ и муфты к ним, ТДЦ покрытие можно рекомендовать как наиболее эффективное для данного назначения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследована структура и свойства трех видов промышленных цинковых покрытий на трубных сталях 45, 30Г2, 37Г2Ф и 37Г2С разной группы прочности. Показано, что покрытия имеют существенные различия по толщине, твердости, коррозионной стойкости и структуре, но при одинаковой технологии цинкования значения этих показателей практически не зависят от металла основы.

2. Уточнен в сравнении с литературными данными фазовый состав покрытий. Показано, что ГЦ покрытие состоит из нескольких слоев: Γ , δ_1 , ζ и η -фаз с разным содержанием цинка в соответствии с фазовой диаграммой Fe-

Zn. ГВЦ и ТДЦ покрытия более однородны, но отличаются друг от друга фазовым составом. ТДЦ покрытие содержит Γ -фазу состава $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$, имеющую сложную кубическую решетку, и δ_1 -фазу состава FeZn_{10} с гексагональной кристаллической решеткой, а также оксиды цинка ZnO .

3. Установлена причина высокой адгезионной износостойкости ТДЦ покрытия, имеющего минимальные значения приведенного весового износа $\Delta m/L$ и коэффициента трения f , связанная с присутствием в поверхностных слоях покрытия оксидов цинка и твердой δ_1 -фазы.

4. Объяснена низкая стойкость к питтинговой коррозии ГЦ покрытия присутствием на его поверхности двух фаз η и ζ разного химического состава и электрохимических свойств.

5. Разработана методика комплексной оценки качества цинковых покрытий, согласно которой ТДЦ покрытие следует отнести к покрытиям с повышенной эксплуатационной надежностью и рекомендовать его использование как стандартизированную технологию для муфт и НКТ в нефтедобывающей промышленности.

6. Разработаны рекомендации по повышению эксплуатационной надежности цинковых покрытий путем дополнительного окисления поверхности покрытия после его нанесения, заключающиеся в дополнительном оксидировании поверхности ТДЦ покрытий (имеется акт использования разработки) и обязательном пассивировании ГВЦ покрытий, что повышает их адгезионную износостойкость и коррозионные свойства.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

В рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Чижов И.А., Меркушкин Е.А., Пачколина П.А., Березовская В.В. Влияние технологии цинкования муфт насосно-компрессорных труб в нефтедобывающей промышленности на структуру и свойства покрытий // Наука и образование (электронный журнал). – 2013. – № 4. – С. 8–29. DOI: 10.7463/0413.0559838.

2. Чижов И.А., Березовская В.В., Макаров А.В., Худорожкова Ю.В. Оценка эксплуатационных свойств цинковых покрытий на муфтах насосно-компрессорных труб // Обработка металлов. – 2013. – № 1. – С. 26–31.

3. Чижов И.А., Пачколина П.А. Комплексный подход к оценке качества цинковых покрытий на муфтах насосно-компрессорных труб на основе исследования их структуры и свойств // Metallurg. – 2013. – № 11. – С. 32–39.

Другие публикации:

4. Чижов И.А., Мезенцева О.В., Березовская В.В. Формирование комплексного подхода в оценке эффективности инноваций при выводе на рынок трубной продукции // Теория и практика коммерческой деятельности. Материалы IX Межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, ГОУ ВПО «КГТЭИ», Красноярск. 2008. С. 137–140.

5. Чижов И.А., Березовская В.В. Эффективность диффузионного цинкования резьбовой поверхности муфт насосно-компрессорных труб для добычи нефти // Сборник трудов X Международной научно-технической уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2009. С. 404–406.

6. Чижов И.А. Анализ технологии термодиффузионного цинкования муфт для НКТ на ОАО «ПНТЗ» // Сборник научных статей XI Международной научно-технической уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых, УрФУ, Екатеринбург, 2010. С. 237–239.

7. Чижов И.А. Методика технико-экономического обоснования выбора покрытия для муфт НКТ в нефтедобывающей промышленности // Физико-химия и технология неорганических материалов. Сборник материалов VIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов, ИМЕТ РАН, Москва, 2011. С. 229–231.

8. Чижов И.А., Меркушкин Е.А., Молчанов Д.Е. Изучение питтинговой коррозии на примере сталей НКТ с различными защитными покрытиями // Сборник научных трудов XII Международной научно-технической уральской школы-семинара металловедов-молодых учёных УрФУ, Екатеринбург, 2011. С. 334–336.

9. Чижов И.А., Березовская В.В. Управление качеством и стоимостью цинкового покрытия муфт насосно-компрессорных труб для добычи нефти // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: Материалы международной конференции XXI Уральской школы металловедов-термистов, Магнитогорск, 2012. С. 101–102.

10. Чижов И.А. Методика управления качеством и стоимостью цинкового покрытия муфт насосно-компрессорных труб // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I междунар. интерат. науч.-практ. конф. Часть 1. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. С. 56–59.

11. Чижов И.А., Пачколина П.А., Худорожкова Ю.В. Структура и свойства Zn-покрытий разной технологии нанесения на трубную сталь 30Г2 // XIII Международной научно-технической уральской школы-семинара молодых ученых – металловедов: Сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 303–306.

12. Чижов И.А., Пачколина П.А., Березовская В.В. Влияние технологии цинкования трубных сталей на структуру и свойства покрытий // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы II междунар. интерат. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2012. С 106–109.